汉语发展性阅读障碍儿童视觉同时性加工技能子成分的发展及其与阅读的关系*

李杰 杨悦 赵婧

（首都师范大学心理学院， 北京 100048 ）

摘 要 通过分别以高频汉字（实验 1）和图形非言语材料（实验 2）为刺激的两个联合视觉注意任务，并采用基于 Budensen 视觉注意理论的参数估计方法，系统地探查小学三~六年级汉语发展性阅读障碍儿童的视觉同时性加工技能缺陷的内在机制。以 43 名汉语发展性阅读障碍儿童和 46 名生理年龄匹配典型发展儿童为被试，每类被试均被分为小学中年级组（三、四年级）和高年级组（五、六年级）。两个实验均发现不同年级组的阅读障碍儿童在知觉加工速度参数上显著小于控制组儿童。在空间注意分布权重参数上，实验 1 的结果显示，不同于控制组儿童向左侧化发展的注意分布模式，两个年级组的阅读障碍儿童均表现为无偏的注意分布；而实验 2 未发现显著组别差异。且这两种同时性加工子技能分别与不同水平的汉语阅读技能密切相关。结果表明，汉语阅读障碍儿童在同时加工多个视觉刺激时存在持续的知觉加工速度缓慢的问题，在同时加工言语类刺激时还表现出异常的空间注意分布模式。本研究有助于从基础认知层面揭示汉语发展性阅读障碍儿童的缺陷机理，为进一步设计相关的提高阅读效率的干预方案提供理论依据。

关键词 汉语发展性阅读障碍，视觉同时性加工技能，视觉注意理论，知觉加工速度，选择性空间注意分布。

1 前言

发展性阅读障碍（Developmental dyslexia，DD）是常见的一种根源于神经生物学、严重且持续存在的学习障碍。世界卫生组织 ICD-10 将其定义为个体在一般智力、动机、生活环境和教育条件等方面与其它个体没有明显差异，也没有明显的视力、听力、神经系统的损伤，但其阅读成绩明显低于同龄人平均水平（World Health Organization, 1993），表现为单词识

收稿日期：2020-08-09

* 国家自然科学基金（31871117）资助。

通讯作者：赵婧，E-mail：conanzj@126.com

别、拼写、编码的困难。以往心理学研究中，主要通过智力测验结合标准化的阅读测验对发展性阅读障碍进行筛选，拼音文字中常用伍德科克阅读能力测试（Woodcock Reading Mastey Tests）进行阅读水平的评估，而汉语文字背景下则常采用标准化汉字识字量测验来评估阅读水平。本研究参考以往文献（Zhao et al., 2018b；田梦雨 等，2016），采用智力测试及汉字识字量测试筛查汉语发展性阅读障碍。由于 DD 患者无法获得高效、流畅的阅读技能，这会导致其较低的学业成就，并进一步影响其社会适应性的发展（刘涵隆，赵婧，2018；Zhao et al., 2018a）。因此很有必要探究 DD 的致病机制以为相应的阅读干预训练方案提供直接的理论依据。考虑到阅读起始于基础的视觉解码，在阅读过程中需要同时加工多个文字或字母材料（Bosse et al., 2007；Facoetti et al., 2000），因此大量研究逐渐从基础视觉加工层面尤其是视觉同时性加工技能方面探究 DD 的致病机理（黄晨，赵婧，2018）。

1.1 发展性阅读障碍儿童的视觉同时性加工技能缺陷

视觉同时性加工技能，主要是指个体在不移动眼球的较短时间内（一般为 200ms 及以下），能够平行加工的视觉刺激数量（Bosse et al., 2007）。以往研究发现，视觉同时性加工技能缺陷与低阅读能力之间存在密切关系。有研究者采用以字母为刺激的全部和部分报告法发现，在排除单字母识别能力的可能影响之后，DD 儿童在同时加工字母串上的成绩仍显著低于同年龄对照组儿童，表现出短时间内同时加工多个视觉刺激的困难，且此视觉同时性加工技能与单词阅读测试成绩显著相关（Bosse et al., 2007；Valdois et al., 2003）。随后，有研究者为了排除字母刺激材料可能带来的形音匹配等语言加工因素的影响，采用以非言语材料为刺激以按键为非言语反应的视觉任务来测查视觉同时性加工技能，相关结果表明在法语、汉语等不同的语言系统下，DD 儿童均表现出显著的视觉同时性加工技能缺陷（曹寒冰，2019；赵婧，2019；Lobier et al., 2012, 2014；Zhao et al., 2018a, 2018b）。此外，针对 DD 儿童的干预研究发现，基于视觉同时性加工技能设计的训练方案可以显著提高其单字和句子阅读测试的成绩（Valdois et al., 2014；Zoubrinetzky et al., 2019），这进一步说明视觉同时性加工技能缺陷与阅读障碍之间的可能因果关系。Bosse 等人（2007）为视觉同时性加工技能对阅读的影响机制提供了一种可能的解释，他们认为 DD 儿童存在同时加工多个视觉元素的缺陷，从而限制了其可以并行加工的元素数量和加工效率，使其不能有效加工较大的视觉单元，进而阻碍快速并行的字词识别过程，并最终导致阅读困难。

然而，有一些研究却发现 DD 者与正常阅读者在同时加工多个视觉刺激的任务上的表现无显著差异（Banfi et al., 2018；Hawelka & Wimmer, 2008；Yeari et al., 2016）。因此，视觉同

时性加工能力与 DD 之间的关系仍存在争议，其缺陷的内在本质仍有待于进一步研究加以明确。有研究者提出视觉同时性加工的缺陷可能是由潜在的不同类型的认知子成分的损伤引起的，如知觉加工速度的降低和较小的视觉短时记忆容量，还可能与注意权重的空间分配和自上而下的控制效率有关（Bogon et al., 2014a；Stefanac et al., 2019；Wiegand et al., 2018）。据此，研究者尝试基于 Bundesen 及其同事（1990，2005）提出的视觉注意理论（theory of visual attention，TVA），采用参数估计的方法，分别从不同认知子成分的角度来深入细致地探究视觉同时性加工技能缺陷的内在机制，以明确此视觉加工技能与阅读困难之间的关系。

1.2 基于视觉注意理论探查发展性阅读障碍儿童视觉同时性加工技能的内在机制

1.2.1 视觉注意理论及相应范式的介绍

TVA 是一种关于视觉注意的数学模型，它描述了选择视觉刺激并将其编码到短时记忆中的过程（Bundesen, 1990；Habekost, 2015）。TVA 模型假设视觉系统独立、并行地加工视野中的所有刺激，所有刺激的加工速度之和是视觉系统的总加工速度（参数 C）。但是不同刺激的加工速度不同，被加工速度快的刺激的一个或多个属性会先被编码到视觉短时记忆中，视觉短时记忆的容量（参数 K）有限，一般为 3~4 个，因此不同视觉刺激间的加工编码是存在竞争的。且这种竞争性的选择加工是有偏向的，单个刺激的注意权重反映了刺激被选择进行加工编码的速度，不同刺激的加工速度在总加工速度中占有的比例不同。干扰刺激与目标刺激的注意权重的比值反映了个体在加工过程中的抗干扰能力（参数 α），是自上而下注意控制效率的衡量指标。视野中不同区域（如，左与右）刺激的注意权重的比较反映了个体在加工刺激中的空间注意偏向，即选择性注意的空间分布模式（参数 ω）。

以往研究常将全部/部分报告法等注意任务与 TVA 模型结合使用，并基于被试在任务中的反应准确性直接估计个体的各项注意参数（Bundesen, 1990；Habekost, 2015）。其中，知觉加工速度和视觉短时记忆容量反映了自下而上受刺激属性驱动的视觉注意，主要通过全部报告法任务进行评测。在全部报告任务中，通常在计算机屏幕中央呈现一个注视点；然后 2~12 个数量不等的刺激（通常是字母）以中心注视点为圆心呈圆形排列在屏幕上（保证各个刺激距注视点等距），刺激呈现时长是从临界阈值水平到接近天花板水平之间随机且等距选取的一系列的数值（一般短于 200ms，以减少眼动）；随后紧跟一个由随机图形组成的掩蔽刺激，以消除被试的视觉残影并精确控制刺激加工的时长；最后要求被试在无猜测的前提下尽可能多的报告之前在屏幕上呈现的刺激。选择性注意的空间分布模式和抗干扰能力反映了自上而下的视觉注意调控，主要通过操纵部分报告法任务中刺激呈现的左右视野位置以及目标刺激

周围是否存在干扰项来进行参数估计。在部分报告法任务中，屏幕左侧或右侧将呈现两种不同颜色的刺激，被试只需要报告其中一种目标颜色的刺激（例如，红色字母），而忽略另一种干扰颜色的刺激（例如蓝色字母），刺激呈现时长为一个固定数值，其他程序设置和全部报告法一致。为提高参数估计的效率，有研究者在传统的 TVA 任务基础之上设计了联合视觉注意（CombiTVA）范式，将全部和部分报告法融合在同一个任务之下，这样就可以通过一个任务同时考察自上而下和自下而上两类视觉注意子成分（Vangkilde et al., 2011）。这也是本研究采用的 TVA 任务，该任务的详细介绍请看本文方法部分。

1.2.2 基于视觉注意理论的发展性阅读障碍研究

目前，基于 TVA 模型的参数估计方法已被广泛运用到探查多动症、轻度认知损伤等临床领域中（Habekost, 2015），但针对 DD 群体的研究仍处在探索阶段（Bogon et al., 2014a；Dubois et al., 2010）。Dubois 等人（2010）第一次尝试采用基于 TVA 理论的参数估计方法来探究两名 9 岁法语 DD 儿童的视觉同时性加工技能。研究首先发现两名 DD 儿童在整体上均表现出严重的多字符加工缺陷，之后采用以字母为刺激的 CombiTVA 任务估计出与视觉同时性加工有关的子成分参数 C、K、ω，发现两名 DD 儿童的 C 均显著低于 9 名同年龄控制组儿童，其中一名 DD 儿童的 K 小于同年龄正常阅读者，但两名 DD 儿童的 ω 与控制组没有显著差异。之后，有研究者扩大被试量，以德语 DD 儿童为被试，分别采用以字母为刺激的全部和部分报告法，并结合 TVA 模型估计出视觉同时性加工技能的子成分 K、C、ω、α 四个参数。该研究结果显示，DD 儿童在参数 K 和 C 上表现出显著的缺陷，但在 ω 和 α 上并未表现出与控制组的显著组别差异（Bogon et al., 2014a）。以上基于 TVA 模型的拼音文字的研究结果表明，DD 儿童在视觉同时性加工技能方面的缺陷可能主要反映了其在视觉短时记忆容量和加工速度等自下而上视觉注意相关子成分上的问题。此外，为了进一步探究这些视觉同时性加工子成分与阅读的关系，有研究采用相关分析发现这些自下而上视觉注意子成分与阅读能力的关联密切，知觉加工速度可以预测典型发展儿童的文本阅读速度，加工速度快的儿童比速度慢的儿童的阅读速度快（Lobier et al., 2013）；视觉短时记忆容量与高频单词阅读准确性显著相关（Bogon et al., 2014a）。同时，有研究进一步发现 DD 者在参数 C 和 K 等自下而上注意子成分的表现会受到年龄发展变化的影响，其中，知觉加工速度缺陷在不同年龄段 DD 者中稳定存在，但视觉短时记忆容量缺陷只在处于发展早期的阅读障碍 DD 儿童中显著（Bogon et al., 2014b）。因此，在今后的相关研究中，需要考虑被试年龄因素的影响。

考虑到汉语区别于线性拼音文字，其视觉字形结构复杂，属于无切分文本。相对于拼音

文字，在汉字识别过程中，需要先对包含不同偏旁部首的复杂汉字字形进行视觉编码，这一加工过程依赖于视觉注意在空间维度的分布权重（Liu et al., 2015）。同时为了保证汉语阅读流畅性，个体需要准确且有效地从句子中辨别词边界，这与抑制周围汉字词组的干扰以将注意聚焦于当前关注的目标词/字上的抗干扰能力密切相关。鉴于此，不同视觉同时性加工子成分在汉语阅读中的作用或许与拼音文字有所不同，汉语阅读可能更需要与自上而下注意有关的子成分。目前，还未见相关研究基于 TVA 探查汉语 DD 者的视觉同时性加工技能。汉语 DD 者是表现出与拼音文字研究结果类似的自下而上注意子成分的缺陷呢？还是反映出汉语语言特异性，表现出自上而下注意子成分的缺陷？这些问题有待于进一步研究加以明确。以往有文献采用特定范式分别探查汉语 DD 者在视觉加工速度、视觉短时记忆容量、空间注意分布模式和干扰抑制方面的表现。如，已有研究采用轮廓幻应范式、针对不同复杂度刺激的探测任务、快速视觉序列呈现任务等发现，汉语 DD 儿童存在基础的视觉加工速度缺陷（顾晨璐，周加仙，2019；田梦雨 等，2016；肖茜 等，2014）；通过数字广度、词汇广度和符号广度等短时记忆任务发现，汉语 DD 儿童表现出显著的视觉短时记忆容量问题（程灶火，龚耀先，1998；刘翔平 等，2005；王恩国 等，2008）；同时有研究采用语音干扰抑制加工、语音编码等任务发现，汉语 DD 儿童表现出干扰抑制能力方面的落后（刘翔平 等，2004；杨炀，2011）；通过视觉识别任务等发现，汉语 DD 儿童存在可能的“左视野忽视”现象（方娴，2019；Zhao et al., 2018a）。这些结果为之后基于 TVA 模型探查汉语 DD 者视觉同时性加工技能的内在机制提供了一定的实证依据。根据这些研究发现可推测，汉语 DD 儿童可能在与视觉同时性加工有关的自上而下和自下而上子成分上都存在缺陷。

此外，以往拼音文字研究结果显示，DD 者在视觉同时性加工子成分上的表现呈现年龄发展的差异（Bogon et al., 2014b）。在汉语阅读习得过程中，随着年龄的增长，语音的作用逐渐减弱，形义匹配关系逐渐建立并稳定（刘涵隆，赵婧，2018）。读者阅读的材料也逐渐由单字水平扩展到句子、篇章水平。其中，发展到高年级时形成的稳定的形义匹配能力和熟练的句子、篇章阅读能力都与视觉同时性加工技能密不可分。由此可推测，视觉同时性加工技能与汉语阅读的关系可能存在发展差异。以往研究也表明汉语 DD 儿童在整体上的视觉同时性加工技能上表现出缺陷，进一步的分析发现此缺陷仅在小学高年级的 DD 儿童中显著，在小学低、中年级 DD 儿童中不显著（Zhao et al., 2018a, 2018b）。那么小学低、中年级 DD 儿童虽在整体上未表现出视觉同时性加工困难，但其在各相关视觉加工子成分上的表现又如何呢？高年级 DD 儿童的视觉同时性加工技能的缺陷又会显著表现在哪个（些）子成分上

呢？这些视觉同时性加工子成分与汉语阅读发展的关系又怎样？这些问题都有待于进一步研究加以明确，后续研究需将被试年龄作为一个重要的考虑因素，从发展的角度探究汉语 DD 儿童在各视觉同时性加工子成分上的表现及其与阅读的关系。

为了回答以上问题，本研究将在汉语语言背景下，基于 TVA 模型参数估计的方法，采用横断发展研究设计系统地探究小学不同年级汉语发展性阅读障碍儿童的视觉同时性加工技能的内在机制，并考察不同视觉同时性加工子成分的发展变化模式及其与汉语阅读的关系。根据汉语特性及以往相关的研究（刘翔平 等，2004，2005；肖茜 等，2014；Bogon et al., 2014b；Zhao et al., 2018a, 2018b），我们预期汉语 DD 儿童在进行视觉同时性加工时，除了可能会表现出与拼音文字研究结果相似的知觉加工速度和视觉短时记忆容量等自下而上子成分上的缺陷，还会在注意空间分布模式和抗干扰能力等自上而下子成分上出现问题，体现出 DD 者认知缺陷的语言特异性，并且其视觉同时性加工子成分的缺陷会表现出发展差异。此外，参考以往文献（Lobier et al., 2013；Stefanac et al., 2019），我们预期视觉同时性加工技能不同子成分可能与不同水平的汉语阅读技能相关。

2 实验 1：以汉字作为刺激探究汉语发展性阅读障碍儿童视觉同时性加工技能子成分的表现及其与阅读的关系

由于以往基于 TVA 模型探查 DD 儿童视觉同时性加工技能内在机制的研究均是以字母作为言语刺激材料，因此在实验 1 中，我们类比地使用高频独体汉字作为言语刺激并结合 CombiTVA 范式，探究不同发展阶段的汉语 DD 儿童的视觉同时性加工能力子成分的表现，并考察可能的子成分缺陷与汉语阅读能力之间的关系。

2.1 研究方法

2.1.1 被试

实验被试包括 43 名 DD 儿童和 46 名同年龄匹配的典型发展儿童（typically developing children，以下简称 TD）。为探讨发展差异的可能影响，两组被试均被划分为高年级组（小学五~六年级）和中年级组（小学三~四年级）。其中，DD 组包括 21 名中年级组儿童（男生 15 人）和 22 名高年级组儿童（男生 19 人）；TD 组包括 23 名中年级组儿童（男生 12 人）和 23 名高年级组儿童（男生 18 人）。各组被试的相关信息如表 1 所示。所有被试均选自北京市一所普通小学 1104 名三至六年级的学生。参考以往研究（Zhao et al., 2018b；田梦雨 等，2016），本研究采用瑞文标准推理测试（张厚粲，王晓平，1985）考察学生的非言语智力水平，采用小学生汉语识字测试（王孝玲，陶保平，1993）对学生进行整体阅读发展水平的评

估，并结合任课语文教师对儿童的日常语文学习能力的主观评定。DD 儿童的筛选标准如下：汉语识字测试成绩低于同年级平均值-1.5 个标准差，瑞文推理测验的标准分高于同年龄常模群体得分的 5%，并且教师评定其在语文成绩上落后同年级儿童平均水平。TD 儿童的筛选标准为：年龄、非言语智力水平与 DD 组相匹配，汉语识字测试成绩处于同年级平均水平。所有被试均为右利手，视力或矫正视力正常，无器质性损伤。同时采用《中国精神障碍分类与诊断标准第 3 版》，以教师评价结合学生自评的方式，排除疑似存在注意力缺陷多动障碍的儿童。在正式实验前，已取得学校老师和家长的知情同意。整个研究项目已通过首都师范大学心理学院伦理审查委员会的审批，相关研究程序和内容符合伦理规范。

此外，研究还通过数字快速命名测试（赵婧 等，2012）、字表朗读测试（Zhao et al., 2017）、和句子朗读测试（Zhao et al., 2017）对被试进行了阅读相关技能测试。数字快速命名考察个体的序列自动化加工能力，重测信度为 0.85。测试材料为 2、4、6、7、9 组成的 6 行 5 列的数字矩阵，取两次测验的平均时间（单位为秒）为最终成绩。字表朗读测试测查单字阅读能力，分半信度为 0.93。字表由 400 个真字、13 个非字组成，被试需要在 1 分钟内又快又准地朗读汉字，遇到非字需要快速用笔划掉。以被试 1 分钟内正确朗读出的汉字个数作为该测试的成绩（单位为字/分钟）。采用句子判断任务测查句子流畅阅读水平，分半信度为 0.85。该测试要求被试朗读电脑屏幕上出现的句子，读完后立刻按空格键，之后按键判断其是否符合常理（例如“一年有十二个月”），记录被试判断正确句子的阅读速度（构成某一句子的汉字数与读完该句所用时间的比值）平均值（单位为字/分钟）。如表 1 所示，整体以及不同年级组的组别比较都显示，DD 组的阅读相关技能成绩均显著低于 TD 组，进一步确保了 DD 被试筛选的有效性。

表 1　不同年级组 DD 和 TD 儿童各项数据的比较 $x\ (s)$

项目	中年级组			高年级组			DD (n = 43)	TD (n = 46)	t
	DD (n = 21)	TD (n = 23)	t	DD (n = 22)	TD (n = 23)	t			
年龄（岁）	9.25 (0.75)	9.28 (0.62)	-0.17	11.46 (0.73)	11.34 (0.67)	0.55	10.37 (1.33)	10.31 (1.22)	0.24
识字量	1005 (307)	1945 (417)	-8.57***	2265 (254)	3195 (96)	-16.08***	1650 (696)	2570 (699)	-6.22***
瑞文智力测试	40.43 (4.99)	40.04 (3.10)	0.30	43.45 (5.48)	44.65 (3.42)	-0.88	41.98 (5.40)	42.35 (3.98)	-0.37
数字快速命名（秒）	14.28 (3.11)	11.21 (2.44)	3.66**	12.61 (3.04)	10.19 (2.59)	2.89**	13.43 (3.15)	10.70 (2.54)	4.51***
字朗读速度（字/分钟）	80.29 (21.90)	100.87 (16.48)	-3.54**	95.55 (17.92)	114.91 (21.08)	-3.31**	88.09 (21.18)	107.89 (20.01)	-4.54***
句子朗读速度（字/分钟）	121.54 (65.73)	149.59 (24.16)	-1.85	150.00 (36.72)	232.88 (131.40)	-2.85**	136.10 (54.21)	191.24 (102.46)	-3.14**

注：*$p < 0.05$，**$p < 0.01$，*** $p < 0.001$。

2.1.2 视觉同时性加工技能子成分测试

刺激材料. 本测试中的视觉刺激材料为 20 个小学生常见汉字，详见附录。刺激材料的选定过程如下：首先从小学生一、二年级语文课本中选取 40 个高频独体汉字；然后由 16 名不参与正式实验的成人（男生 8 人）对这些汉字的视觉复杂度进行五点评分（1 分表示非常简单，5 分表示非常复杂）；基于主观评分结果，从 40 个汉字中选取复杂度处于中等水平的 20 个汉字作为最终的目标刺激，其平均复杂度为 2.47±0.88。

测试任务及流程. 本研究在 Vangkilde 等人（2011）设计的 CombiTVA 范式基础上进行了反应形式的修改，以提高被试的反应效率。在以往 CombiTVA 范式中，被试需要口头报告出每个试次中所有的目标刺激，而刺激数量最多有 6 个，这样就可能出现被试一边报告一边遗忘的情况，且口头报告的形式涉及形音匹配、语音提取等加工过程。所以，本研究将被试的反应由口头报告改为按键判断，被试需要按键判断最后出现在屏幕中的刺激是否包含在目标刺激中。实验程序使用 E-prime 软件编制，在 Windows 操作系统的计算机上呈现，计算机的尺寸是 14 英寸，分辨率是 1024 × 768 像素，刷新频率是 60 Hz。被试距离屏幕 50 cm。

本测试中，每个试次的流程如图 1 所示：首先在黑色屏幕中央呈现 1000ms 的红色十字注视点；随后，目标刺激出现在以此十字注视点为中心的正六边形的六个端点所在位置处，这六个端点的离心率均为 2.02°；目标刺激呈现之后紧跟着呈现 500ms 的黑屏掩蔽；最后在屏幕中央出现一个红色汉字，被试需要判断最后出现的这个汉字是否在之前的目标刺激中呈现过，“是”按“Z”键，“否”按“B”键。不限制被试的按键反应时间，要求其尽量准确地进行判断。实验中的目标刺激有三种类型（图 1）：第一种为六个位置全部显示红色目标汉字，刺激呈现时长是在 40ms、79ms、158ms 和 200ms 几种条件下[†]等概率随机选取的一个数值，包含这种刺激类型的共有 216 个试次；第二种是在六个位置上只显示两个红色目标汉字，刺激呈现时长为 79ms，包含此类刺激的共 108 个试次；第三种是在六个位置上呈现两个红色目标汉字及四个蓝色干扰汉字，刺激呈现时长为 79ms，包含此类刺激的共 108 个试次。实验过程中，所有目标刺激类型是混合随机呈现的。实验中的目标刺激均是由从前面提到的 20 个高频汉字中随机选取的不重复的相应数量的汉字组成的，每个汉字的视角为 0.69°× 0.69°，相邻两汉字间距为 2.84°视角。本测试包括一组练习（36 个试次）和 12 组正式实验（每组 36 个试次），12 组正式实验的顺序在被试间随机。在每组测试之后，反馈给被试相应的反应

[†]为了使 TVA 参数估计效果最好，刺激呈现的时间需覆盖每个被试的整个表现范围，从阈值水平到接近天花板水平。因此参考以往文献（Bogon et al., 2014b；Dubois et al., 2010；Vangkilde et al., 2011），随机选取 16 名不参与正式实验的小学生进行预实验，据此确定出 4 个刺激呈现时间，分别为 40ms、79ms、158ms 和 200ms。

正确率，并鼓励他们尽可能多的注意红色目标汉字。

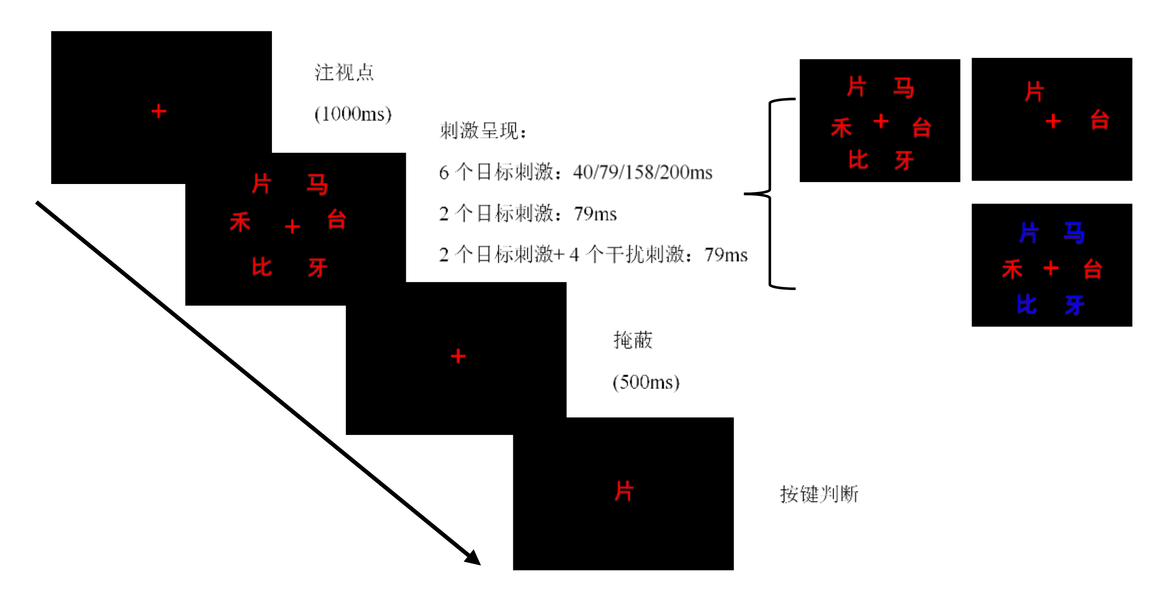


图 1 基于言语材料的视觉同时性加工技能子成分测查任务示意图

2.1.3 基于 TVA 模型的参数估计

本研究采用 LIBTVA 开源程序（Dyrholm et al., 2011；Kyllingsbaek, 2006）进行参数估计。将每个被试在每个试次之下的目标（干扰）刺激呈现位置、刺激呈现时长和反应正确情况等信息进行编码，然后将相应的数据列表输入该程序，之后经过基于 TVA 模型的最大似然估计得到 4 个子成分参数: 知觉加工速度 C、视觉短时记忆存储容量 K、选择性注意的空间分布模式 ω 和视觉空间注意抗干扰能力 α。其中，知觉加工速度 C 反映了每秒加工的视觉元素的数量，其是基于 TVA 模型拟合出的正确报告刺激数量与刺激呈现时间指数函数对应的曲线斜率。视觉短时记忆容量 K 表示并行加工的视觉元素的最大存储量，其是正确报告刺激数量与刺激呈现时间指数函数的渐近线对应的数值。当刺激同时显示在两个视野区域中，可以根据被试反应数据估计其注意权重的空间注意的偏侧化分布参数 *ω*。其计算公式为 $\omega = \omega_L / (\omega_L + \omega_R)$，取值范围为 0~1。通过 ω 与 0.5 的比较来测量分布的偏侧化程度，$\omega = 0.5$ 表示注意力空间分布无偏；$\omega > 0.5$ 表示选择性注意向左侧偏侧化；$\omega < 0.5$ 表示选择性注意向右侧偏侧化。此外，可以根据干扰刺激与目标刺激的注意权重的比值衡量自上而下的注意控制效率 α。α 值接近 0 意味着个体在加工过程中未受干扰的影响，干扰抑制的注意控制效率高；而 α 值接近 1 意味着抗干扰能力差，自上而下的控制能力受损，不能有效地区分出目标刺激和干扰刺激。

2.1.4 统计分析

使用 SPSS 18.0 进行数据录入和分析，剔除±3 个标准差以外的数据。计量资料符合正态分布。分别以知觉加工速度 C、视觉短时记忆存储容量 K、选择性注意的空间分布模式 ω、视觉空间注意的抗干扰能力 α 为因变量，以年级组（中、高年级组）和被试类型（DD、TD 组）为组间变量，对数据进行两因素方差分析，以探查不同年级组汉语 DD 儿童的视觉同时性加工技能子成分的发展差异。同时，采用单样本 t 检验测查选择性注意的空间分布模式 ω 与 0.5 值之间的差异，以探究被试的空间注意分布权重的偏侧化情况。此外，采用分层回归分析进一步探究可能的视觉同时性加工子成分缺陷与汉语阅读能力之间的关系。本研究主要以显著性水平 p 值作为检验指标，若分析得到某结果对应的 $p < 0.05$，此结果则被认为显著。

2.2 结果

2.2.1 视觉同时性加工技能子成分的分析

被试在视觉同时性加工技能各子成分上的表现及相应的方差分析的结果如表 2 所示。对于知觉加工速度，方差分析的结果显示，组别主效应显著[F (1, 85) = 18.68, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.18$]，DD 儿童的知觉加工速度显著慢于 TD 儿童；年级主效应显著[F (1, 85) = 9.22, $p = 0.003$, $\eta^2 = 0.10$]，高年级儿童的知觉加工速度显著快于中年级儿童；年级与组别的交互作用不显著[F (1, 85) = 0.66, $p = 0.42$]。

以选择性注意的空间分布模式参数为因变量，方差分析结果显示，主效应和交互作用均不显著[组别：F (1, 85) = 0.05, $p = 0.82$；年级：F (1, 85) = 1.32, $p = 0.25$；交互作用：F (1, 85) = 0.45, $p = 0.51$]。选择性注意偏侧化分布参数 ω 与 0.5 进行的单样本 t 检验的结果显示，整体上，DD 组及 TD 组 ω 值与 0.5 差异均不显著[DD 组：t (43) = -0.87, $p = 0.39$；TD 组：t (45) = -1.86, $p = 0.07$]，表明 DD 组和 TD 组的选择性注意无偏侧化分布。区分不同年级组的单样本 t 检验结果显示，除了中年级 TD 组 ω 值显著小于 0.5 [t (22) = -2.44, $p = 0.02$]，其他组别的 ω 值与 0.5 差异均不显著（$ps > 0.1$），说明不同年级组的 DD 儿童选择性注意分布模式均无偏侧化，而中年级 TD 组的选择性注意分布模式向右侧偏侧化，高年级 TD 组的选择性注意分布模式无偏侧化。

表 2 汉字材料下视觉同时性加工子成分的描述统计及差异检验 $x(s)$

项目	中年级		高年级		F(组别)	F(年级组)	F(交互作用)
	DD (n = 21)	TD (n = 23)	DD (n = 22)	TD (n = 23)			
C	6.91 (1.57)	8.26 (0.96)	7.93 (1.34)	8.85 (1.05)	18.68***	9.22**	0.66
K	3.30 (0.04)	3.31 (0.05)	3.28 (0.58)	3.29 (0.04)	1.12	2.22	0.04
ω	0.49 (0.05)	0.49 (0.03)	0.50 (0.04)	0.50 (0.02)	0.05	1.32	0.45

α	8.10×e^{-7} (6.80×e^{-7})	9.13×e^{-7} (1.05×e^{-6})	9.55×e^{-7} (1.23×e^{-6})	4.78×e^{-7} (3.84×e^{-7})	<0.001	<0.001	<0.001

注：** $p < 0.01$，*** $p < 0.001$。C 为知觉加工速度，K 为视觉短时记忆储存容量，ω 为选择性注意的空间分布模式，α 为视觉空间注意的抗干扰能力。

分别以视觉短时记忆容量和视觉空间注意的抗干扰能力参数为因变量，结果显示，所有主效应和交互作用均不显著（$ps > 0.1$）。

2.2.2 视觉同时性加工技能子成分缺陷与阅读的关系

方差分析结果表明 DD 儿童在知觉加工速度和选择性注意的空间分布模式两个视觉同时性加工子成分上存在缺陷，为进一步明确这两个子成分缺陷与汉语阅读的关系，在对子成分 C、ω 与阅读相关技能测试成绩进行全相关的基础上（见表 3），我们进一步采用分层回归分析考察不同子成分对单字和句子朗读成绩的预测作用。针对字朗读成绩建立了两个分层线性模型（见表 4），每个模型分为四层，第一层为人口学变量，包括年龄和非言语智力水平；第二层加入组别变量；其中，模型 1 将知觉加工速度作为第三层，空间偏侧化参数作为第四层；模型 2 中第三、四层的加入顺序与模型 1 相反，第三层加入空间偏侧化参数，第四层加入知觉加工速度。针对句子朗读成绩也建立了与前面类似的两个模型（见表 4）。回归分析的结果表明，选择性注意的空间分布模式子成分可显著地独立解释 3.4%的单字朗读速度的变异 [$F(1, 83) = 4.34, p = 0.04$]；知觉加工速度对句子朗读速度的成绩具有显著预测作用，其独立的贡献为 4.3% [$F(1, 84) = 5.01, p = 0.03$]。

表 3　汉字和图形材料下视觉同时性加工子成分 C、ω 与阅读测试成绩的全相关分析

阅读测试	汉字材料		图形材料
	C	ω	C
字朗读	0.19	0.22*	0.16
句子朗读速度	0.10	0.01	0.01

注：* $p < 0.05$。C 为知觉加工速度，ω 为选择性注意的空间分布模式。

表 4　汉字材料下视觉同时性加工子成分 C、ω 与阅读测试成绩的回归分析

任务	步骤	预测变量	R^2	F	ΔR^2	ΔF	β
字朗读速度	第一层		0.10	4.72*	0.10	4.72*	
		年龄					0.29*
		IQ					0.10
	第二层	组别	0.29	11.77***	0.20	23.41 ***	0.51***
	第三层	C	0.31	9.51***	0.02	2.23	-0.15
	第四层	ω	0.35	8.78***	0.03	4.34*	0.19*
	第三层	ω	0.33	10.37***	0.04	4.64*	0.19*

	第四层	C	0.35	8.78***	0.02	1.96	-0.15
句子朗读速度	第一层		0.13	6.47**	0.13	6.47**	
	年龄	年龄					0.36 **
		IQ					0.16
	第二层	组别	0.24	8.71***	0.10	11.58**	0.42***
	第三层	C	0.28	8.08***	0.04	4.97*	-0.26*
	第四层	ω	0.28	6.43***	0.001	0.17	-0.04
	第三层	ω	0.24	6.48***	0.001	0.08	-0.04
	第四层	C	0.28	6.43***	0.04	5.01*	-0.26*

注：*$p < 0.05$，** $p < 0.01$，*** $p < 0.001$。C 为知觉加工速度，ω 为选择性注意的空间分布模式。

2.3 讨论

实验 1 采用高频汉字作为刺激材料测查视觉同时性加工技能，结果表明随着儿童年级的升高，其知觉加工速度会变快，但是不同年级 DD 儿童均存在知觉加工速度缺陷。这与以往拼音文字研究结果一致（Bogon et al., 2014a；Dubois et al., 2010），说明此子成分缺陷具有跨语言一致性。进一步的回归分析发现该视觉同时性加工子成分与句子朗读速度密切相关。同时，本研究还发现，TD 儿童的选择性空间注意权重的分布模式从右偏发展为无偏，呈现出向左发展的趋势。但不同年级组 DD 儿童的选择性空间注意均呈无偏的对称分布。之后的回归分析结果显示，选择性空间注意偏侧化参数对单字朗读速度的成绩具有显著预测作用，个体的选择性注意空间分布越向左偏，字朗读速度越快。该结果说明，DD 儿童持续无偏侧化的注意分布模式可能与汉字阅读成绩落后有关。本实验结果反映了汉语 DD 儿童不仅表现出自下而上视觉同时性加工技能子成分的缺陷，还在自上而下注意控制方面的子成分上表现出困难，在一定程度上体现出了汉语语言特异性。

然而实验 1 采用的是汉字刺激材料，视觉同时性加工任务中会涉及到与汉字有关的语言加工过程（如汉字字形编码、形音匹配、语音提取等）。而 DD 儿童在这些汉语加工技能上本来就存在困难，那么他们在视觉同时性加工任务中表现出的缺陷到底反映的是视觉认知方面的问题还是语言技能层面的缺陷？这仍有待通过进一步的研究加以明确。因此，在实验 2 中引入图形作为非言语刺激材料，以更纯粹地探究汉语 DD 儿童的视觉同时性加工技能子成分表现及与其阅读的关系。根据以往研究（Bogon et al., 2014b; Dubois et al., 2010），我们假设在同时加工多个非言语材料时，汉语 DD 儿童的知觉加工速度缺陷会持续存在，反映出基础视觉加工层面的问题。但考虑到注意空间分布模式与阅读的密切关系，其缺陷则可能表现出言语材料的特异性，在加工非言语材料时的缺陷会不如加工多个汉字材料时那么明显。

3 实验 2：以图形作为非言语刺激探究汉语发展性阅读障碍儿童视觉同时性加工技能子成分的表现及其与阅读的关系

3.1 研究方法

3.1.1 被试

同实验 1。

3.1.2 视觉同时性加工技能子成分测试及参数估计

为了减少言语刺激材料对结果带来的影响，本实验采用 15 个图形作为非言语刺激材料，如附录所示。图形刺激的确定过程如下：首先，基于相关研究（Huang et al., 2019）中使用的非言语刺激先选定 25 个图形材料；邀请 16 名不参与正式实验的成人(男生 8 人)对这 25 个图形的视觉复杂度进行 5 点评分（1 分表示非常简单，5 分表示非常复杂）；根据评分结果，选出复杂度处于中等水平的 15 个图形作为最终的目标刺激，其平均复杂度为 2.35±1.10。除刺激材料变化之外，实验 2 所使用的仪器、流程（见图 2）、记录的反应指标、基于 TVA 模型进行参数估计的方法均与实验 1 相同。

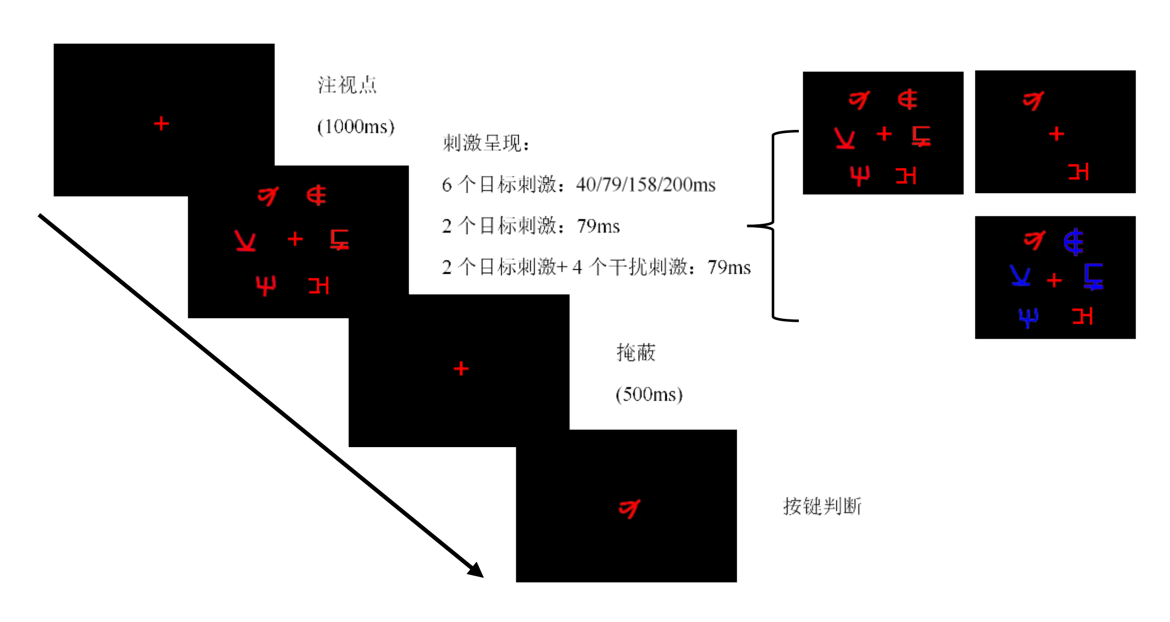


图 2　基于非言语材料的视觉同时性加工技能子成分测查任务示意图

3.1.3 统计方法

使用 SPSS 18.0 进行数据录入和分析，剔除±3 个标准差以外的数据。统计分析方法与实验 1 基本相同。此外，为了探查汉语 DD 儿童在视觉同时性加工技能各个子成分上的表现是否会受到刺激材料特性的影响，实验 2 采用配对样本 t 检验测查言语材料和非言语材料中子

成分水平的可能差异。

3.2 结果

3.2.1 视觉同时性加工技能子成分的分析

分别对视觉同时性加工技能各子成分进行年级组×被试类型的两因素方差分析。结果显示（见表 5），在知觉加工速度参数 C 上，组别主效应显著[$F(1, 85) = 4.56, p = 0.04, \eta^2 = 0.05$]，TD 儿童的视觉加工速度显著快于 DD 儿童；年级主效应显著[$F(1, 85) = 5.06, p = 0.03, \eta^2 = 0.06$]，高年级儿童的视觉加工速度显著快于中年级儿童；年级与组别的交互作用不显著[$F(1, 85) = 0.23, p = 0.64$]。除此之外，其他三个子成分上的方差分析均未发现显著的主效应和交互作用（$ps > 0.1$）。并且，选择性注意空间分布模式 ω 与 0.5 的单样本 t 检验的结果在各水平下也均不显著（$ps > 0.1$），说明 DD 和 TD 儿童在非言语图形刺激的 TVA 任务中没有表现出选择性注意分布权重的偏侧化。

在比较言语材料（实验 1）和非言语材料（实验 2）中各视觉同时性加工子成分表现时，针对整个样本或针对不同年级不同组别内进行的配对样本 t 检验结果均表明，被试同时加工多个言语刺激材料的知觉加工速度显著高于同时加工多个非言语材料的加工速度（$ps < 0.001$），而在其他子成分上的差异比较均不显著（$ps > 0.05$）。

表 5 图形材料下视觉同时性加工技能子成分的描述统计及差异检验 $x(s)$

项目	中年级		高年级		F(组别)	F(年级组)	F（交互作用）
	DD ($n = 21$)	TD ($n = 23$)	DD ($n = 22$)	TD ($n = 23$)			
C	5.97 (1.61)	6.72 (1.23)	6.75 (1.45)	7.22 (1.08)	4.56*	5.06*	0.23
K	3.29 (0.05)	3.29 (0.05)	3.27 (0.05)	3.28 (0.05)	0.40	2.23	0.08
ω	0.48 (0.09)	0.48 (0.05)	0.48 (0.05)	0.50 (0.04)	1.11	1.07	0.50
α	0.001 (0.003)	$8.91 \times e^{-7}$ ($8.78 \times e^{-7}$)	$7.95 \times e^{-7}$ ($8.26 \times e^{-7}$)	$7.17 \times e^{-7}$ ($5.61 \times e^{-7}$)	1.13	1.13	1.13

注：*$p < 0.05$，C 为知觉加工速度，K 为视觉短时记忆储存容量，ω 为选择性注意的空间分布模式，α 为视觉空间注意的抗干扰能力。

3.2.2 视觉同时性加工技能子成分缺陷与阅读的关系

在实验 2 中，方差分析结果表明 DD 儿童仅在知觉加工速度子成分上显著落后于 TD 儿童。所以，在对子成分 C 与阅读相关技能测试成绩进行全相关的基础上（见表 3），进一步通过分层回归分析考察此子成分表现对阅读测试成绩的预测作用。分别针对字朗读速度和句子朗读速度建立了两个分层线性模型（见表 6），每个模型自变量输入形式相似，输入步骤分为三层：第一层为人口学变量，包括年龄和非言语智力水平；第二层加入组别变量；第三

层加入知觉加工速度 C。结果表明，知觉加工速度对单字朗读速度的成绩没有显著预测作用，但可显著地独立解释句子朗读速度成绩上 4%的变异 [F (1, 84) = 4.59, p = 0.04]。

表 6 图形刺激下视觉同时性加工子成分 C 与阅读测试成绩的回归分析

任务	步骤	预测变量	R^2	F	ΔR^2	ΔF	β
字朗读速度	第一层		0.10	4.72*	0.10	4.72*	
		年龄					0.29*
		IQ					0.07
	第二层	组别	0.29	11.77***	0.20	23.41***	0.45***
	第三层	C	0.30	8.78***	0.001	0.17	-0.04
句子朗读速度	第一层		0.13	6.47**	0.13	6.47**	
		年龄					0.33**
		IQ					0.15
	第二层	组别	0.21	8.71***	0.10	11.58 **	0.37***
	第三层	C	0.24	7.95***	0.04	4.59*	-0.22*

注：*p < 0.05， ** p < 0.01， *** p < 0.001，C 为知觉加工速度。

3.3 讨论

实验 2 以图形作为非言语刺激材料探查较纯粹的视觉同时性加工子成分表现。研究结果仍显示出 DD 儿童在加工速度（参数 C）上显著落后于 TD 儿童。这说明 DD 儿童在同时加工多个视觉刺激时的知觉加工速度缺陷不受刺激材料语言因素的显著影响。同时，本实验还发现所有儿童对言语材料的知觉加工速度均显著快于非言语材料，这与以往研究结果一致（Stefanac et al., 2019）。被试在加工熟悉的字母、汉字等言语材料时，可以直接将言语刺激映射到相应的语音表征上，加工速度会更快（Bogon et al., 2014a；Stefanac et al., 2019）。相对而言，被试对图画、符号等非言语刺激不太熟悉，在加工过程中会占用更多的注意资源，由于认知资源的有限性，进而造成知觉加工速度的减慢。回归分析结果表明知觉加工速度仍可显著预测句子朗读速度的变异，且对变异的解释程度与使用汉字作为刺激材料的实验 1 结果相似。此结果说明视觉同时性加工技能与句子阅读的关系主要体现在知觉加工速度这一认知子成分上。儿童的知觉加工速度越快，每秒可以加工的视觉信息越多，在阅读的过程中的形-音通达效率越高，阅读速度越快。

此外，与实验 1 结果不同，实验 2 结果表明不同年级的 DD 和 TD 儿童在选择性注意空间分布模式上均显示出无偏侧化的分布，这与以往采用非言语刺激材料的研究结果一致（Stefanac et al., 2019）。此结果说明实验 1 中，DD 儿童相比 TD 儿童表现出的加工多个视觉刺激时的异常空间注意分布权重与言语材料特性有关。在加工非言语材料时，不论是 TD

儿童还是 DD 儿童，均不会受到从左向右的阅读经验影响，视觉空间注意资源在左右视野范围内呈现无偏分布。

4 总讨论

本研究分别采用以言语材料和非言语材料为刺激的 CombiTVA 任务，基于 TVA 模型参数估计的方法，探查不同年级组汉语 DD 儿童的视觉同时性加工技能子成分的表现及其与汉语阅读的关系。结果表明，汉语 DD 儿童在知觉加工速度子成分上表现出显著缺陷，并且此缺陷在不同年级组的 DD 儿童加工不同类型的刺激时持续存在，同时此技能水平与句子层面的阅读速度密切相关；此外，汉语 DD 儿童仅在同时加工多个汉字刺激时表现出异常的选择性注意偏侧化模式，且此偏侧化程度与单字水平的阅读效率有关；然而在自上而下注意控制效率和视觉短时记忆容量等子成分上，汉语 DD 儿童未表现出显著缺陷。

4.1 汉语发展性阅读障碍儿童在同时加工多个视觉刺激时表现出知觉加工速度缺陷

实验 1 和实验 2 的研究结果表明，DD 儿童在同时加工多个言语与非言语材料时均显著地表现出知觉加工速度缺陷。此结果说明 DD 儿童的同时性加工技能缺陷与其对视觉材料的低加工效率密切相关，这主要反映了基础层面的视觉加工速度缺陷，而不是由语音-正字法表征缺陷或对刺激材料的语言加工速度较低引起，与研究预期一致，表明低知觉加工速度是 DD 儿童在进行多刺激同时性加工过程中最常见的缺陷（Stefanac et al., 2019）。此外，与 TD 儿童相比，DD 儿童在言语材料中的知觉加工速度下降率比在非言语材料中更高（言语材料：13.20%；非言语材料：8.61%），即 DD 儿童的知觉加工速度缺陷在言语刺激材料中表现更显著，与以往研究（Stefanac et al., 2019）结果不一致。以往有研究者采用字母和像字母的无意义符号作为刺激材料，发现阅读障碍儿童在加工符号刺激时的缺陷比字母更严重（Stefanac et al., 2019）。此研究中的符号刺激类似字母，且与字母刺激在视觉复杂度上相似，所以被试在加工这些符号时可能会激活类似于加工文本的字形解码过程。而 DD 儿童存在对文字字形结构加工的问题（肖茜 等，2014；Stefanac et al., 2019），特别是对于不熟悉的文字刺激（即符号材料），这种视觉字形加工缺陷会更加明显，进而使其在同时加工多个符号刺激时的知觉加工效率更低。在本研究中，虽然采用的图形和汉字材料在视觉复杂度上相似，但是本研究中的图形刺激是几何线条图，外形上不同于汉字。被试在以汉字为刺激材料的 TVA 任务中，在基础视觉分析之后会自动激活进一步的字形正字法解码等高级语言加工过程，DD 儿童最终表现出的知觉加工缺陷可能同时反映了其在基础视觉加工和后期语言信息表征两方面的累加问题。但在以图形为刺激的 TVA 任务中，可能只会涉及基础视觉空间分析过程，

DD 儿童最终表现出的则主要是基础视觉加工效率缺陷。因此，DD 儿童在加工汉字刺激时的知觉加工速度缺陷相较于加工图形材料时更加明显。另外，考虑到 DD 儿童由于阅读经验或阅读习得技能的缺乏，对汉字的熟悉度可能会低于 TD 儿童，但两组儿童对图形材料的熟悉度不受阅读经验的影响，是类似的。这种言语材料熟悉度上的组别差异可能是导致两组儿童知觉加工速度差异更大的另一种原因，以言语材料为主的阅读活动可能会放大 DD 患者的知觉加工速度缺陷。

同时，相比于 TD 儿童，DD 儿童在知觉加工速度上的降低率随着年级的升高表现出减小的趋势（汉字材料中，中年级 vs 高年级：16.34% vs. 10.40%；图形材料中，中年级 vs 高年级：11.16% vs. 6.51%），说明尽管知觉加工速度缺陷一直存在于 DD 儿童中，但此缺陷呈现出发展性减弱的趋势，与预期不符，与拼音文字研究中的发展趋势也存在差异。Bogon 等人（2014b）的研究表明德语 DD 儿童和 DD 成人在同时加工多个字母刺激时表现出相似程度的知觉加工速度缺陷，说明此子成分缺陷在不同年龄段的 DD 中可能是持续且稳定存在的。这种不一致的结果可能与知觉加工速度在不同背景语言下的发展特性差异有关。以往拼音文字研究显示知觉加工速度在小学阶段持续发展（Sperling et al., 2003），而在汉语阅读习得过程中，典型发展儿童的知觉加工速度在小学二至五年级并未表现出显著的增长（肖茜等，2014）。由此可推测，汉语儿童的知觉加工速度在小学阶段保持的较为稳定，这便给汉语 DD 儿童提供了可以追赶上同年龄正常阅读者相应技能水平的机会，使 DD 组与控制组的差异在高年级阶段有所缩小。此外，另一种可能原因与汉语语言特性有关。由于汉语文字字形结构复杂且是无切分文本，汉语阅读经验对视觉同时性加工技能会有一定的促进作用（李杰，赵婧，2020）。由于小学高年级 DD 儿童的阅读经验比中年级 DD 儿童更加丰富，这可能会改善其快速同时加工多个视觉刺激的整体水平，也会对刺激的知觉加工效率有积极影响。因此，DD 儿童在进行视觉同时性加工时表现出的知觉加工速度缺陷在高年级时可能会有所缓解，表现出一定程度的由阅读经验增长而带来的代偿效应。未来需要进一步在汉语青少年或成人阅读困难群体中，探查他们在知觉加工速度这一视觉同时性加工技能子成分上的表现。

4.2 汉语发展性阅读障碍儿童在同时加工多个汉语材料时的异常选择性注意空间分布模式

本研究发现汉语 DD 儿童在同时加工多个汉字材料时的空间注意分布模式表现出异于 TD 组的发展趋势，与假设一致。不同年级的 TD 儿童在对言语材料进行加工时，其选择性空间注意分布模式呈现出从右偏到无偏的向左发展的趋势；而不同年级的 DD 儿童均呈现出

无偏的选择性空间注意分布，表现出在此视觉同时性加工子成分上的异常发展模式。以往研究表明，在从左向右阅读的文字系统中，在阅读习惯和阅读经验的影响之下，熟练阅读者在单次注视同时加工多个字符时，注视点常位于该字符串中央的偏左侧位置（Ducrot & Pynte, 2002; Sireteanu et al., 2005），即说明视觉同时性加工过程中存在注意分布的左侧优势现象。而 DD 者由于有右视野注意抑制缺陷，其注意资源会受到右视野内信息的过度干扰，造成了其对左视野内信息的忽视（Hari & Renvall, 2001；Facoetti et al., 2006），进而导致其在左右视野上的表现无显著差异，呈现出无偏的注意资源分布模式。

此外，以往拼音文字研究发现，9 岁、12 岁和成人 DD 者在同时加工多个字母刺激时，其选择性空间注意分布模式均未表现出显著的偏侧化现象；对于正常阅读者而言，直到成人读者才表现出显著的注意资源左侧化的分布模式（Bogon et al., 2014a, 2014b; Stefanac et al., 2019; Stenneken et al., 2011）。以上发现说明拼音文字背景下，在此同时性加工子成分上表现出的缺陷直到成人阶段才显著。这与本研究结果不一致，本研究发现汉语阅读障碍者在小学阶段就显著表现出在视觉空间注意分布模式这一子成分上的缺陷。以上不一致的研究结果在一定程度上反映了汉语语言特异性的影响。由于汉语的文字视觉结构复杂、无词切分线索等特点，汉字字形的整体视觉分析可能对汉语阅读发展有很显著的影响。而视觉同时性加工的空间注意分布模式子成分与此整体视觉分析有着密切关系，因此汉语 DD 者在这个子成分所表现出的缺陷则更容易显著。同时，由于对图形或符号刺激的加工不受阅读经验的影响，注意资源的分配较灵活，因此所有被试在以图形为刺激的 CombiTVA 任务中呈现出无偏侧化的空间注意分布模式。

4.3 汉语发展性阅读障碍儿童在视觉短时记忆容量和抗干扰能力等同时性加工子成分上表现正常

本研究结果表明汉语 DD 儿童的视觉短时记忆容量与 TD 儿童相当，即汉语 DD 儿童在同时加工多个视觉刺激时，其在短时记忆存储容量上表现正常。以往关于 DD 者视觉同时性加工视觉短时记忆容量子成分上的研究结果存在争议，有研究发现 DD 者在此子技能上表现出显著的缺陷（Bogon et al., 2014a；Dubois et al., 2010），而另一些研究则发现 DD 者在这一子成分上的表现与控制组相似（Stefanac et al., 2019；Stenneken et al., 2011）。这些不一致的结果可能与 DD 的群体异质性有关，未来研究可以区分 DD 的亚类型来进一步明确 DD 者在该视觉同时性加工子成分上的表现情况。此外，本研究中被试的视觉短时记忆容量在言语材料和非言语材料之间没有显著差异，但 Stefanac 等人（2019）采用字母言语刺激和符号非言

语刺激进行比较，发现儿童在言语刺激中的视觉短时记忆容量要比非言语刺激中的大。这种结果的不一致可能与实验范式的差异有关。以往研究是报告全部目标刺激，而本研究对 TVA 范式进行了调整，将反应形式变为进行“是”或“否”按键判断的部分反应，以在减小语音加工、工作记忆等无关因素影响的基础上测查更纯粹的视觉同时性加工技能。但由于从刺激矩阵呈现到反应判断可能 2s 左右，此过程在一定程度上可能会受到瞬时记忆的影响。此外，视觉刺激的视角属性也可能会影响实验结果。视野分为中央凹（以注视点为圆心，1°视角为半径的区域）、副中央凹（以注视点为圆心，5°视角为半径且在中央凹外的区域）和外周区域（为 5°视角半径外的区域）三个区域（Frey & Bosse，2018）。同时性加工技能反映的是对以中央凹为主的区域进行的视觉信息加工（Frey & Bosse，2018），以往均采用大约 3.8°视角的以 5~6 个字母为刺激的全部和部分报告进行测量（Bosse et al., 2007）。以往同时性加工子成分的研究呈现的刺激范围是以注视点为圆心，7.5°视角为半径的区域（Stefanac et al., 2019），此结果可能反映了变异性更大的知觉广度，本研究将视角改为以 2.02°为半径的区域，结果可能更能反映变异性小的视觉同时性加工技能。

此外，本研究发现汉语 DD 儿童的自上而下的注意调控（即抗干扰能力）在言语材料和非言语材料上，与 TD 儿童相比均没有显著差异。并且，所有被试在此参数上数值均接近于 0。此结果与以往研究一致（Bogon et al., 2014a；Dubois et al., 2010；Stenneken et al., 2011；Stefanac et al., 2019），说明 DD 的同时性加工技能缺陷可能不是由抑制无关目标的能力较差引起的（Bogon et al., 2014b）。这也可能是由于 TVA 范式中刺激间视角比较大，不容易形成拥挤效应所致。

4.4 视觉同时性加工技能子成分与汉语阅读的关系

本研究发现汉语儿童的选择性注意空间分布模式和知觉加工速度两种同时性加工子技能分别与不同水平的阅读技能密切相关。儿童的选择性注意空间分布模式可预测其单字朗读的速度；儿童的知觉加工速度可预测其句子朗读的速度。

选择性注意的空间分布模式反映了个体自上而下的视觉注意调控，知觉加工速度则反映了个体自下而上受刺激属性驱动的视觉注意。根据阅读双通路模型（DRM），阅读过程需要亚词汇和词汇两个加工通路（Ekstrand et al., 2019；Stefanac et al., 2019）。以往有研究表明，亚词汇阅读更多是一种有意识的、需要分配更多注意资源的加工活动，需要阅读者对正字法单元进行解析，通过集中的、自上而下的空间注意加工，阅读者可以通过注意调控有目的地移动注意焦点，将单词解析成最小的正字法单位，并通过连续的发音将其组合成一个连贯的

单词；而词汇阅读更多是一种自动化的整体加工过程，主要依靠自动的、自下而上的无意注意定向加工过程，读者将单词作为一个整体进行自动的并行加工，根据先前学习的信息快速检索相对应的发音，实现自动阅读（Ekstrand et al., 2019）。据此可推测，在本研究的汉字阅读过程中，快速朗读有字间空格的汉字字表需要有意识的自上而下注意加工过程参与其中，以合理分配空间注意资源，有助于顺利完成单字正字法结构的解析及进一步的形音匹配和语音提取过程。而句子水平的阅读测试中使用的文字材料均很简单，可以直接基于自动的自下而上的注意过程来快速进行整体加工，以完成对整句发音和意义的提取。

5 结论

综上，本研究发现，在同时加工多个视觉刺激时，汉语 DD 儿童存在知觉加工速度缓慢的问题，且此子技能缺陷在不同刺激类型、不同年级组 DD 儿童中持续存在；特别是在加工多个汉字刺激时，汉语 DD 儿童还表现出在选择性空间注意分布模式上的异常发展，反映出汉语特异性对 DD 儿童认知缺陷的可能影响。并且，这些子成分的技能水平与不同层次的汉字阅读效率密切相关。本研究弥补了汉语 DD 儿童同时性加工子成分研究的空白，有助于从基础认知加工层面以及从发展的角度深入了解汉语 DD 者的内在致病机理，并为阅读障碍的干预矫治提供一定的理论依据。但本研究仍存在一定的局限性。首先，本研究为了更好的排除语音加工、工作记忆等因素的影响，将实验范式改为“是”或“否”的按键反应，但可能因此影响对短时记忆容量的测查。未来可以进一步改良实验程序，使之更加严谨。其次，本研究只采用了以生理年龄匹配儿童作为控制组的组别比较方法，研究结果不能区分认知缺陷与阅读困难两者关系的方向性。未来研究可以采用干预、追踪等研究方法探讨同时性加工子成分与阅读技能的因果关系。此外，DD 是一种特殊的学习障碍，存在不同的亚类型，其认知加工方式和神经机制也因类型不同而有所差异。但本研究未能对所筛选的 DD 儿童进行亚类型的划分，未来研究可以进一步比较不同亚类型的 DD 者在视觉同时性加工子成分上的表现。最后，本研究中在解释结果时所提出的一些推论，如使用自上而下、自下而上注意技能与词汇/亚词汇加工通路的对应关系来解释知觉加工速度与注意权重偏侧化程度这两个子成分分别和不同的汉语阅读技能的相关关系，这需要未来研究结合脑电、脑成像等技术探究各子成分对应的神经机制，以此对汉语 DD 儿童视觉同时性加工缺陷内在子成分与阅读的关系机制进行深入探究。

附录

表 S1 汉字和图形刺激的视觉复杂度得分 *M (SD)*

编号	汉字	复杂度	图形	复杂度
1	马	2.13 (1.03)	[illegible]	2.06 (1.00)
2	片	2.50 (1.10)	[illegible]	2.44 (1.15)
3	禾	2.31 (0.95)	[illegible]	2.25 (1.07)
4	半	2.63 (0.86)	[illegible]	2.13 (1.09)
5	目	2.31 (1.08)	[illegible]	1.63 (0.96)
6	羊	2.63 (0.96)	[illegible]	2.19 (0.98)
7	台	2.75 (0.78)	[illegible]	2.62 (0.89)
8	也	2.19 (0.91)	[illegible]	2.81 (1.17)
9	闪	2.50 (1.03)	[illegible]	2.31 (1.25)
10	比	2.87 (0.89)	[illegible]	2.13 (1.09)
11	巴	2.69 (0.79)	[illegible]	2.69 (1.20)
12	从	2.50 (0.97)	[illegible]	2.94 (1.12)
13	牙	2.69 (0.79)	[illegible]	2.75 (1.29)
14	业	2.75 (0.68)	[illegible]	2.00 (1.03)
15	方	2.19 (1.05)	[illegible]	2.31 (1.20)
16	什	2.19 (0.66)		
17	今	2.19 (0.66)		
18	化	2.31 (0.79)		
19	为	2.44 (0.89)		
20	本	2.69 (0.79)		

参考文献

Banfi, C., Kemény, F., Gangl, M., Schulte-Körne, G., Moll, K., & Landerl, K. (2018). Visual attention span performance in German-speaking children with differential reading and spelling profiles: no evidence of group differences. *Plos One, 13*(6), e0198903.

Bogon, J., Finke, K., & Stenneken, P. (2014a). TVA-based assessment of visual attentional functions in developmental dyslexia. *Frontiers in Psychology, 5*, 1172.

Bogon, J., Finke, K., Schulte-Körne, G., Müller, H. J., Schneider, W.X., & Stenneken, P. (2014b). Parameter-based assessment of disturbed and intact components of visual attention in children with developmental dyslexia. *Developmental Science, 17*(5), 697–713.

Bosse, M.L., Tainturier, M.J., & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia: the visual attention span deficit hypothesis. *Cognition, 104*(2), 198–230.

Bundesen, C. (1990). A theory of visual attention. *Psychological Review, 97*(4), 523–547.

Bundesen, C., Habekost, T., & Kyllingsbæk, S. (2005). A neural theory of visual attention. Bridging cognition and neurophysiology. *Psychological Review, 112*(2), 291–328.

Cao, H. B, (2019). *The characteristics of visual attention span in dyslexic primary school students* (Unpublished master's dissertation). Liaoning Normal University.

[曹寒冰. (2019). *小学阅读障碍儿童的视觉注意广度特征* (硕士学位论文). 辽宁师范大学.]

Chen, Z. H., Gong, Y. X. (1998). A study of memory in children with learning disabilities: I. short-term memory and working memory of children with learning disabilities. *Chinese Journal of Clinical Psychology, 6*(3), 3–5.

[程灶火, 龚耀先. (1998). 学习障碍儿童记忆的比较研究Ⅰ.学习障碍儿童的短时记忆和工作记忆. *中国临床心理学杂志, 6*(3),3–5.]

Dubois, M., Kyllingsbæk, S., Prado, C., Musca, S.C., Peiffer, E., & Lassus-Sangosse, D. (2010). Fractionating the multi-character processing deficit in developmental dyslexia: evidence from two case studies. *Cortex, 46*(6), 717–738.

Ducrot, S., & Pynte, J. (2002). What determines the eyes' landing position in words? *Perception & Psychophysics, 64*, 1130–1144.

Dyrholm, M., Kyllingsbæk, S., Espeseth, T., & Bundesen, C. (2011). Generalizing parametric models by introducing trial-by-trial parameter variability: the case of TVA. *Journal of mathematical psychology, 55*(6), 416–429.

Ekstrand, C., Neudorf, J., Gould, L., Mickleborough, M., & Borowsky, R. (2019). Where words and space collide: the overlapping neural activation of lexical and sublexical reading with voluntary and reflexive spatial attention. *Brain Research*, *1706*, 1–12.

Facoetti, A., Paganoni, P., Turatto, M., Marzola, V., & Mascetti, G. G. (2000). Visual-spatial attention in developmental dyslexia. *Cortex, 36*(1), 109–123.

Facoetti, A., Zorzi, M., Cestnick, L., Lorusso, M.L., Molteni, M., & Paganoni, P., et al. (2006). The relationship between visuo-spatial attention and nonword reading in developmental dyslexia. *Cognitive Neuropsychology, 23*(6), 841–855.

Frey, A., & Bosse, M.L. (2018). Perceptual span, visual span, and visual attention span: three potential ways to quantify limits on visual processing during reading. *Visual Cognition, 26*(6), 1–18.

Gu, C. L.， Zhou, J. X. (2019). Character processing of Chinese developmental dyslexic children with rapid-serial-visual presentation paradigm. *Journal of Bio-education, 7*(2), 70–79.

[顾晨璐, 周加仙. (2019). 汉语发展性阅读障碍儿童对快速视觉呈现汉字的加工. *教育生物学杂志, 7*(2),70–79.]

Habekost, T. (2015). Clinical TVA-based studies: a general review. *Frontiers in Psychology*, *6*, 290.

Hari, R. & Renvall, H. (2001). Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia. *Trends in Cognitive Science, 5*(12), 525–532.

Hawelka, S., & Wimmer, H. (2008). Visual target detection is not impaired in dyslexic readers. *Vision Research, 48*(6), 850–852.

Huang, C., Lorusso, M. L., Luo, Z., & Zhao, J. (2019). Developmental differences in the relationship between visual attention span and Chinese reading fluency. *Frontiers in Psychology, 10*, 2450.

Huang, C., & Zhao, J. (2018). Visual-spatial attention processing in developmental dyslexia. *Advances in Psychological Science*, *26*(1), 72–80.

[黄晨，赵婧. (2018). 发展性阅读障碍的视觉空间注意加工能力. *心理科学进展*, *26*(1), 72–80.]

Kyllingsbaek, S. (2006). Modeling visual attention. *Behavior Research Methods, 38*(1), 123–133.

Li, J., & Zhao, J. (2020). Visual attention span deficit in Chinese children with developmental dyslexia. *Chinese Mental Health Journal*, *34*(8), 667–672.

[李杰，赵婧. (2020). 汉语发展性阅读障碍儿童的视觉注意广度缺陷. *中国心理卫生杂志*, *34*(8), 667–672.]

Liu, D., Chen, X., & Chung, K.K.H. (2015). Performance in a visual search task uniquely predicts reading abilities in third-grade Hong Kong Chinese children. *Scientific Studies of Reading*, *19*(4), 1–18.

Liu, H. L., & Zhao, J. (2018). The development of visual attention span and its effect on reading fluency in Chinese children with developmental dyslexia. *Psychological Development and Education*, *34*(5), 533–540.

[刘涵隆，赵婧. (2018). 汉语发展性阅读障碍儿童视觉注意广度的发展及其对阅读流畅性的作用. *心理发展与教育*, *34*(5), 533–540.]

Liu, X. P., Ding, D., & Yang, S. (2004). Research on the phonetic interfere restraining of developmental dyslexia children. *Chinese Journal of Special Education*, *8*, 80–84.

[刘翔平，丁玎，杨双. (2004). 阅读障碍儿童的语音干扰抑制能力研究. *中国特殊教育*, *8*, 80–84.]

Liu, X. P., Du, W. Z., Wang, B., & Wu, S. W. (2005). Study on characteristics of visual short-term memory ability of Chinese-speaking dyslexic children. *Chinese Journal of Special Education*, *12*, 48–55.

[刘翔平，杜文忡，王滨，吴思为. (2005). 汉语发展性阅读障碍儿童视觉短时记忆特点研究. *中国特殊教育*, *12*, 48–55.]

Lobier, M., Zoubrinetzky, R., & Valdois, S. (2012). The visual attention span deficit in dyslexia is visual and not verbal. *Cortex*, *48*(6), 768–773.

Lobier, M., Dubois, M., & Valdois, S. (2013). The role of visual processing speed in reading speed development. *Plos One*, *8*(4), e58097.

Lobier, M. A., Peyrin, C., Pichat, C., Le, B.J., & Valdois, S. (2014). Visual processing of multiple elements in the dyslexic brain: evidence for a superior parietal dysfunction. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 479.

Sireteanu, R., Goertz, R., Bachert, I., & Wandert, T. (2005). Children with developmental dyslexia show a left visual "minineglect". *Vision Research*, *45*(25-26), 3075–3082.

Sperling, A. J., Lu, Z. L., Manis, F. R., & Seidenberg, M. S. (2003). Selective magnocellular deficits in dyslexia: a "phantom contour" study. *Neuropsychologia*, *41*, 1422–1429.

Stefanac, N., Spencer-Smith, M., Méadhbh Brosnan, Vangkilde, S., Castles, A., & Bellgrove, M. (2019). Visual processing speed as a marker of immaturity in lexical but not sublexical dyslexia. *Cortex*, *120*(4), 567–581.

Stenneken, P., Egetemeir, J., Schulte-Korne, G., Müller, H.J., Schneider, W.X., & Finke, K. (2011). Slow perceptual processing at the core of developmental dyslexia: aparameter-based assessment of visual attention. *Neuropsychologia*, *49*(12), 3454–3465.

Fang, X. (2019). *The visual-spatial attention's characteristics of Chinese developmental dyslexia children* (Unpublished master's dissertation). Liaoning Normal University.

[方娴. (2019). *汉语发展性阅读障碍儿童视觉空间注意特征* (硕士学位论文). 辽宁师范大学.]

Tian, M. Y., Zhang, X., Zhang, Y. W., & Bi, H. Y. (2016). Preliminary exploration of attention ability in different visual field in Chinese developmental dyslexia. *Studies of Psychology and Behavior, 14*(3), 289–297.

[田梦雨, 张熙, 张逸玮, 毕鸿燕. (2016). 汉语发展性阅读障碍儿童的不同视野注意能力. 心理与行为研究, 14*(3), 289–297*.]

Valdois, S., Bosse, M.L., Ans, B., Carbonne, S., Zorman, M., & David, D., et al. (2003). Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia: evidence from two case studies. *Reading & Writing, 16*(6), 541–572.

Valdois, S., Peyrin, C., Lassus-Sangosse, D., Lallier, M., Demonet, J. F., & Kandel, S. (2014). Dyslexia in a Frenche-Spanish bilingual girl: Behavioural and neural modulations following a visual attention span intervention. *Cortex, 53*, 120–145.

Vangkilde, S.A., Bundesen, C., & Coull, J.T. (2011). Prompt but inefficient: nicotine differentially modulates discrete components of attention. *Psychopharmacology, 218*(4), 667–680.

Wang, E. G., Sen, D. L., Lv, Y. (2008). Short-term memory, working memory and processing speed in children with Chinese learning disabilities. *Psychological Science, 31*(1), 5–10,15.

[王恩国, 沈德立, 吕勇. (2008). 语文学习困难儿童的短时记忆、工作记忆和加工速度. *心理科学, 31*(1), 5–10,15.]

Wang, X. L., & Tao, B. P. (1996). *Chinese character recognition test battery and assessment scale for primary school children.* Shanghai, China: Shanghai Education Press.

[王孝玲, 陶保平. (1993). *小学生识字量测试题库及评价量表.* 上海: 上海教育出版社.]

Wiegand, I., Lauritzen, M.J., Osler, M., Mortensen, E.L., Rostrup, E., Rask, L., et al. (2018). EEG correlates of visual short-term memory in older age vary with adult lifespan cognitive development. *Neurobiology of Aging, 62*, 210–220.

World Health Organization. (1993). *The ICD-10 classification of mental and behavioural disorder*s. World Health Organization.

Xiao, Q., Zhang, Y. W., Zhao, J., & Bi, H. Y. (2014). Visual temporal processing in Chinese children with developmental dyslexia. *Chinese Mental Health Journal*, *28*(9), 679–684.

[肖茜, 张逸玮, 赵婧, 毕鸿燕. (2014). 汉语发展性阅读障碍儿童的视觉快速加工能力. *中国心理卫生杂志*, *28*(9), 679–684.]

Yang, Y. (2011). *An investigation for the nature of phonological working memory deficit in Chinese children with developmental dyslexia* (Unpublished master's dissertation). Graduate university of Chinese academy of sciences.

[杨炀. (2011). *汉语发展性阅读障碍儿童语音工作记忆缺陷机制探索*(硕士学位论文).中国科学院研究生院.]

Yeari, M., Isser, M., & Schiff, R. (2016). Do dyslexic individuals present a reduced visual attention span? Evidence from visual recognition tasks of non-verbal multi-character arrays. *Annals of Dyslexia, 67*(2), 128–146.

Zoubrinetzky, R., Collet, G., Nguyen-Morel, M.-A., Valdois, S., & Serniclaes, W. (2019). Remediation of allophonic perception and visual attention span in developmental dyslexia: a joint assay. *Frontiers in Psychology, 10*, 1502.

Zhao, J. (2019). Skills of visual attention span in developmental dyslexia. *Advances in Psychological Science*, *27*(1), 20–26.

[赵婧. (2019). 发展性阅读障碍的视觉注意广度技能. *心理科学进展, 27*(1), 20–26.]

Zhao, J., Bi, H. Y., & Yang, Y. (2012). Rapid naming and orthographic processing skill in children with Chinese developmental dyslexia. *Chinese Mental Health Journal*, *26*(1), 36–40.

[赵婧, 毕鸿燕, 杨炀. (2012). 汉语发展性阅读障碍儿童的快速命名与正字法加工技能. *中国心理卫生杂志*, *26*(1), 36–40.]

Zhao, J., Kwok, R.K.W., Liu, M., Liu, H., & Huang, C. (2017). Underlying skills of oral and silent reading fluency in Chinese: perspective of visual rapid processing. *Frontiers in Psychology, 7*, 2082.

Zhao, J., Liu, M, Liu, H., & Huang, C. (2018a). The visual attention span deficit in Chinese children with reading fluency difficulty. *Research Developmental Disabilities, 73*, 76–86.

Zhao, J., Liu, M., Liu, H., & Huang, C. (2018b). Increased deficit of visual attention span with development in Chinese children with developmental dyslexia. *Scientific Reports, 8*(1), 3153.

Zhang, H. C., & Wang, X. P. (1985). *Raven standard progressive matrices: Chinese city revision (in Chinese)*. Beijing, China: Beijing Normal University Publishing House.

[张厚粲, 王晓平. (1985). *瑞文标准推理测验手册(中国城市修订版)*. 北京：北京师范大学出版社.]

Reduced processing speed and abnormal attentional weight at the cores of visual simultaneous processing deficit in Chinese children with developmental dyslexia

LI Jie, YANG Yue, ZHAO Jing

(School of Psychology, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract

Chinese children with developmental dyslexia (DD) have been found to show a deficit in processing multi-elements in a variety of visual tasks parallelly. Nevertheless, the potential mechanisms of this visual simultaneous processing deficit and its relation to the reading ability still remain unclear. The ability of simultaneously processes multi-character strings is restricted by different cognitive components, including perceptual processing speed, visual short-term memory capacity, selective spatial attention distribution pattern, and the ability to inhibit distractors. Therefore, this article attempted to explore the potential mechanisms underlying the visual simultaneous processing in Chinese children with DD in the framework of the theory of visual attention (TVA). Two experiments are conducted to investigate the fundamental cognitive components regarding the visual simultaneous processing skill, with further examining the relationship between these components and the Chinese reading ability from developmental perspective.

43 Chinese children with DD and 46 chronological-age matched children with normal reading ability are recruited, and the two groups respectively include students from high and low grades in primary schools for the purpose of probing into the developmental changes in these TVA-based components of the visual simultaneous processing. The two experiments separately utilize high-frequency Chinese characters as verbal materials and the symbols as nonverbal materials. A modified combined theory of visual attention (CombiTVA) paradigm is employed to collect participants' performances during the multi-element processing. Based on the response accuracy in each level of CombiTVA task, the four parameters including processing speed (C), visual short-term memory storage (K), attentional weight (ω), and irrelevant inhibition (α) are estimated through TVA

model.

We first compare the four TVA parameters between groups and grades, and then conduct hierarchical regression analyses to examine the contributions of possible impaired TVA parameters of reading difficulty. The results of the two experiments illustrate that the DDs from high and low grades both exhibit reduced perceptual processing speed comparing to the controls during processing multiple elements in parallel, with a trend of developmental decrease in this component deficit. Moreover, significant differences in the selective spatial attention distribution pattern between dyslexic and normal readers are only present in Experiment 1 with Chinese characters as the stimuli rather than in Experiment 2 with the nonverbal symbols as the stimuli. In details, during multi-processing of Chinese characters, a balanced pattern in attentional distribution is observed in DDs from both two grade groups; while the attentional weight of normal readers develops from right-lateralized to balanced patterns. Further hierarchical regression analyses reveals that the impaired components of visual simultaneous processing are separately associated with different levels of Chinese reading, the component of perceptual processing speed independently and effectively accounts for the variance of the sentence reading performance regardless of material properties, while the component of selective spatial attention distribution pattern is related to the single-character reading speed. These findings unfold the modulation of language specificity of Chinese to the cognitive deficits of DDs to some extent.

This research is helpful to deepen our understanding of the internal mechanism of the visual simultaneous processing deficit in Chinese dyslexic children, and contribute to designing relevant intervention targeting visual simultaneous processing skills to improve reading efficiency in the dyslexics.

Key words Chinese developmental dyslexia, visual simultaneous processing skill, theory of visual attention, perceptual processing speed, selective spatial attention distribution pattern